

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В. СКОБЕЛЬЦИНА

А.В. Аванесов, А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко

**ДИНАМИКА И СТРУКТУРА ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОШНУРОВ ПЛАЗМЫ В
БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2007 – 5/826

Москва - 2007

УДК 621.3.032.35

ББК 22.345

E-mail: V.Saenko@mics.msu.su

Preprint of Institute of Nuclear Physics № 2007-5/826

A.V. Avanesov, A.T. Rakhimov, V.B. Saenko

**DYNAMICS AND STRUCTURE OF THE FORMATION OF PLASMA
MICROCORDS IN THE BARRIER DISCHARGE**

Abstract

An experimental stand "OZONE" has been created to explore dynamics and structure of plasma microcords in the barrier discharge with different form of electrodes and to determine an efficiency of the ozone electrosynthesis depending on the barrier discharge plasma characteristics. Investigations had been carried out with the different barrier discharge devices, which enabled to optimize the barrier discharge sources of strongly non-equilibrant plasma and to develop effective mini-ozonizers and SW UV-radiation generators.

The investigation is executed by support grants RFBR № 07-08-00683 and SS-7101.2006.2.

A.B. Аванесов, А.Т. Рахимов, В. Б. Саенко

**ДИНАМИКА И СТРУКТУРА ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОШНУРОВ ПЛАЗМЫ
В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ**

Аннотация

Создан экспериментальный стенд «ОЗОН» для исследования динамики и структуры образования микрошнуров плазмы в барьерном разряде с различной формой электродов, а также для определения эффективности электросинтеза озона в зависимости от характеристик плазмы барьерного разряда. Исследования проведены с различными устройствами барьерного разряда, что позволило провести оптимизацию источников сильнонеравновесной плазмы на основе барьерного разряда и разработать достаточно эффективные мини-озонаторы и генераторы коротковолнового УФ излучения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 07-08-00683 и НШ-7101.2006.2.

© Аванесов А.В., Рахимов А.Т., Саенко В.Б., 2007

© НИИЯФ МГУ, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Введение.....	4
2.	Экспериментальный стенд «ОЗОН».....	5
3.	Исследование особенностей образования микроразрядов в различных ячейках барьерного разряда.....	13
4.	Заключение.....	23
5.	Литература.....	24

1. Введение

Барьерный разряд является эффективным источником сильнонеравновесной плазмы и интенсивно исследуется ведущими научными центрами. Интерес к источникам сильнонеравновесной плазмы связан с возможностью создания эффективных озонаторов и источников коротковолнового УФ излучения [1-3], разработкой УФ/O₃-технологии для микроэлектроники [4], плазменных телевизоров [5] и широкого применения в различных областях науки и техники [6-8]. Примером может служить активная деятельность в этом направлении такой известной электротехнической фирмы, как АBB [2]. Генерация УФ излучения и электросинтез озона являются достаточно высокоэнергетическими процессами, поэтому в настоящее время УФ/O₃ - технологии находят ограниченное применение в микроэлектронике, медицине и экологии. В значительной мере развитие УФ/O₃-технологии зависит от наличия эффективных, надежных и не слишком дорогих источников УФ и озона. Основная цель данной работы - исследование тонкой структуры барьерного разряда в зависимости от параметров его горения, регулируемых извне (разрядный промежуток, материал электрода и диэлектрика, наличие или отсутствие перенапряжения и т.д.), а также исследование возможности более эффективной организации электродной структуры барьерного разряда для создания источников УФ излучения и озона.

2. Экспериментальный стенд «ОЗОН»

Несмотря на то, что многие свойства барьерного разряда уже хорошо изучены, некоторые его особенности и поныне представляют большой интерес с научной точки зрения. В частности, в литературе присутствуют указания на то, что при асимметричном устройстве разрядной ячейки (с одним диэлектрическим и одним проводящим электродом) количественный состав и свойства продуктов плазмохимической реакции, а также строение плазмы и степень ее неравновесности существенно различны в зависимости от полярности диэлектрического электрода (катод или анод), особенно при значениях разрядного промежутка, меньших 1 мм. Для исследования этого вопроса была спроектирована экспериментальная разрядная установка для анализа электрических характеристик барьерного разряда. Блок-схема установки приведена на рис.1. В установке использовались два плоских электрода, один из которых был проводящим, а второй был сменным. Характеристики сменного диэлектрика, а именно его материал (стекло или керамика), толщина (2-8 мм) и диэлектрическая проницаемость (5-1000 ед.) варьировались, рис. 2. Проводящий электрод был экранирован заземленным экраном (с отверстием в центре), что позволяло ограничить площадь рабочей поверхности, с которой проводились измерения, а также ликвидировать влияние краевых процессов. Это особенно важно при использовании сменных диэлектрических электродов с разной площадью поверхности.

На установку подавалось синусоидальное напряжение промышленной частоты, преобразуемое высоковольтным трансформатором до амплитуды 10 кВ. Электросинтез озона проводился из кислорода при атмосферном давлении.

Для снятия данных использовалась интегрирующая схема (рис.1.). Измерительный конденсатор включался последовательно с разрядной ячейкой. После прохождения через разрядный промежуток серии микроразрядов на нем появлялся импульс напряжения, пропорциональный величине перенесенного заряда. Фиксировалось время появления и прохождения в межэлектродном пространстве серии микроразрядов (с привязкой по фазе к питающему напряжению), а также величина заряда, перенесенного во внешней цепи разрядной ячейки. При прохождении серии микроразрядов, на измерительном конденсаторе скачкообразно меняется напряжение. Скачок напряжения на измерительном конденсаторе отслеживается системой синхронизации, состоящей из двух компараторов, регистрирующих факт прохождения микроразрядов положительной и отрицательной полярности. Сигнал с компараторов поступает на управляющий микроконтроллер, который при помощи аналого-цифрового преобразователя измеряет величину переносимого заряда в серии и передает его через последовательный интерфейс на вход ЭВМ.

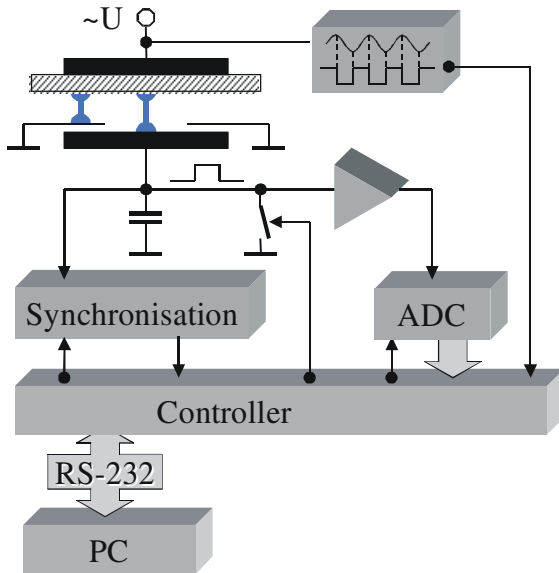


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

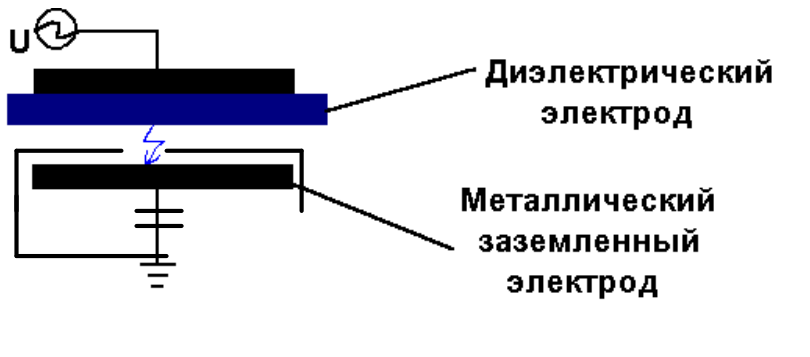


Рис.2. Асимметричная разрядная ячейка.

Цикл регистрации данных можно описать следующими стадиями:

1. Возникновение и прохождение серии микроразрядов; инициализация измерительного блока;
2. Первое измерение напряжения на измерительной емкости;
3. Разряд измерительной емкости;
4. Второе изменение напряжения на измерительной емкости.

Момент прохождения разряда регистрируется компараторами. Сигнал с компаратора генерирует прерывание микропроцессора. Далее управление передается процессору. Когда система не работает в режиме регистрации заряда, ключ K2 замкнут. При возникновении серии микроразрядов процессор подает команду на выключение ключа K2. По отключении обоих ключей от измерительной емкости напряжение на ней остается постоянным. Далее по команде контроллера инициализируется АЦП и происходит измерение напряжения на измерительной емкости. По завершении этого этапа, процессор подключает к системе оба ключа, которые интенсивно разряжают емкость до величины ~ 0 В. После установки напряжения в ноль происходит повторное измерение. Процессор сохраняет в памяти разность между двумя измерениями и время прохождения микроразрядов. По завершении измерений ключ K2 остается замкнутым, шунтируя ток.

При включении питания или при появлении сигнала RESET, система привязки по фазе ожидает появления максимума напряжения питания. Затем происходит регистрация и измерение заряда на измерительном конденсаторе. Каждый раз при переходе величины питания через максимум или минимум счетчик времени сбрасывается и измеряется напряжение на измерительной емкости. Емкость буферной памяти микропроцессора позволяет заполнить результаты 120 измерений. По заполнению буфера микроконтроллер прекращает измерения и начинает передачу данных по последовательному порту с интерфейсом RS-232 на скорости 115200 бит/с в компьютер. При этом передаются не все сигналы, а только результаты завершеного измерения для полувольты напряжения. Например, если измерение для полувольты 3 считается завершенной, а для полувольты 4 незавершенной, данные измерения полувольты 4 игнорируются. Во время передачи данных измерения не проводятся. По окончании передачи ожидается приход полувольты высокого напряжения той полярности, измерение для которой считается незавершенным, и процесс накопления данных начинается заново.

Для исследования электросинтеза озона в барьерном разряде в зависимости от полярности диэлектрического электрода, была сконструирована установка, на которой можно анализировать работу электроразрядной ячейки в различных условиях и проводить количественный анализ продуктов синтеза. Схема установки приведена на рис. 3.

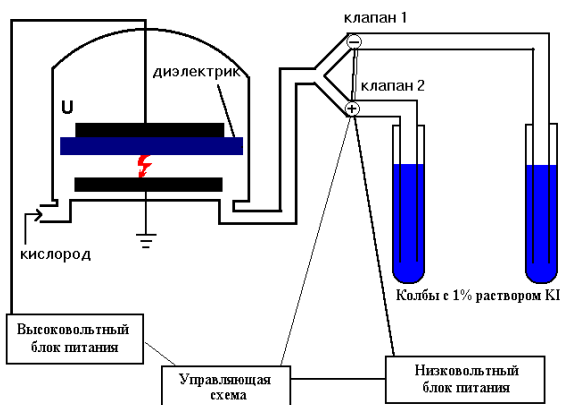


Рис.3. Блок-схема установки для количественного анализа озона при малой концентрации.

Установка состояла из разрядной ячейки, блока высокого напряжения, подающего напряжение до 13 кВ на разрядный промежуток, управляющей схемы, регулирующей подачу высокого напряжения и переключение клапанов, а также блока химического анализа, позволяющего проводить раздельный количественный анализ газовых смесей, полученных при разрядах различной полярности.

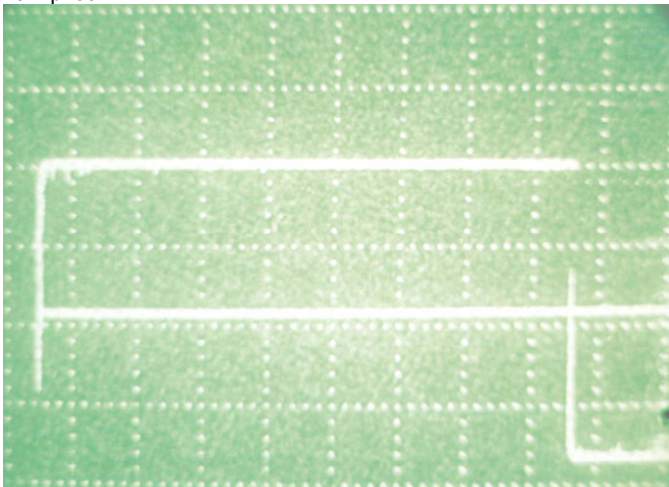


Рис. 4 Осциллограмма переменного напряжения, питающего разрядную ячейку. Цена деления: по X - 1 сек/деление, по Y – 2 кВ/деление.

Фронты импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности, питающих разрядную ячейку, показаны на рис. 5.

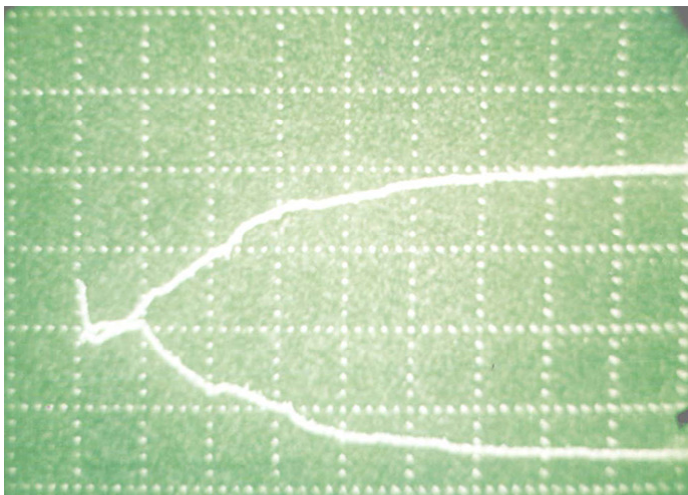


Рис. 5 Фронты импульсов напряжения положительной и отрицательной полярности. Цена деления: по X - 10 мсек/деление, по Y - 2 кВ/деление.

На рис. 6 приведена электрическая схема установки.

Принципиальная электрическая схема электроразрядной установки

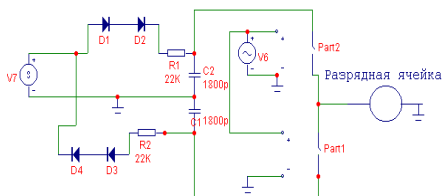


Рис.6. Принципиальная электрическая схема электроразрядной установки.

В данной установке применялось несколько разрядных ячеек. Первая из них была сделана из алюминиевой плитки, служащей одновременно

металлическим заземленным электродом, и стеклянного колпака, накрывающего эту плитку. В колпаке были предусмотрены отверстия для входа кислорода и для высоковольтного провода, подающего напряжение на сменный диэлектрический электрод. Выход озоносодержащей смеси осуществлялся через отверстие в центре алюминиевой плитки. Преимуществом этой ячейки была возможность наблюдать за разрядом через прозрачный стеклянный колпак, недостатками – невозможность достичь полной герметичности (колпак прижимался пружинами к резиновой прокладке) и небольшая площадь электродов (несколько см²).

Вторая разрядная ячейка была выполнена из алюминия, оргстекла и нержавеющей стали. Подвижным был металлический (заземленный) электрод, причем установка необходимого разрядного промежутка производилась с помощью винта с шагом резьбы 1.5 мм. Так как верх и низ ячейки соединялись 12 болтами, то поворот винта, соединенного с электродом, на расстояние между двумя соседними болтами, соответствовал промежутку в 125 мкм. Это позволило обойтись без проставок. Конструкция ячейки также предусматривала охлаждение электродов проточной водой, однако в этом не было потребности из-за низкой частоты работы, поэтому на металлический электрод вода не подавалась, а в пространство под диэлектриком было залито некоторое количество солевого раствора (для лучшего контакта). Несмотря на некоторые недостатки этой ячейки (сложность сборки и разборки, непрозрачность), она была признана наиболее перспективной для дальнейших исследований из-за таких ценных свойств, как полная герметичность, легкость установки разрядного промежутка и большая площадь электродов (металлического - 50 см², диэлектрического - 75 см²). Также применялась неразборная ячейка со стеклянным электродом, толщина которого составляла 2.4 мм, а площадь - 40 см².

Принцип работы управляющей схемы состоит в том, что логическая схема с программируемым интервалом, устанавливаемым, как правило, на 5-8 секунд, включает и выключает с данным периодом высоковольтные ключи, которые переключают полярность напряжения на разрядной ячейке Амплитуда высоковольтного напряжения менялась лабораторным автотрансформатором (ЛАТР). Газовая смесь направляется в одну из поглотительных колб. По истечении 1/2 периода на разрядную ячейку подается напряжение, одновременно происходит переключение клапанов так, что газовая смесь, находившаяся в разрядной ячейке в момент прохождения разряда, направляется в другую поглотительную колбу. Таким образом, озон, синтезированный в результате разрядов разной полярности, накапливается в различных колбах и, следовательно, может быть проанализирован отдельно.

Для количественного анализа синтезированного озона был выбран метод йодометрического титрования. Этот стандартный метод для определения окислителей состоит в следующем: к окислителю (в данном случае озону) добавляют избыток йодида, а выделившийся йод титруют стандартным раствором тиосульфата натрия. В качестве индикатора применяется крахмал. Так как озон выделялся неравномерно, то он поглощался газовой пипеткой с точно отмеренным объемом стандартного раствора KI в течение определенного времени. После появления визуальных признаков окисления достаточного количества йодида (сильное пожелтение раствора) оттитровывался тиосульфатом. Для эффективного поглощения газовой смеси, содержащей озон, и полного растворения озона в растворе KI в нижней части поглотительной колбы был установлен керамический распылитель, служащий рассекателем

пузырьков газа. Во время опыта поддерживалось давление газовой смеси, достаточное для того, чтобы газ проходил через эти фильтры-рассекатели, установленные в нижней части поглотительных колб.

В процессе экспериментов на данной установке варьировались следующие количественные параметры:

1) Прилагаемое напряжение. Как правило, оно составляло 6 - 10 кВ, что было достаточно для пробития разрядного промежутка, менявшегося в пределах 0.05-1.0 мм. Диапазон изменения высокого напряжения выбирался, во-первых, из соображений поддержания в разрядной ячейке максимальной производительности по озону при данных условиях, и, во-вторых, с целью предохранения высоковольтных элементов установки от неконтролируемого пробоя. На промежутках до 0.4 мм включительно использовалось напряжение 6-9 кВ, на промежутках 0.4-1.0 мм - 8.5-10 кВ. В таких условиях время накопления озона в поглотительных колбах составляло от 1 до 5 часов.

2) Частота питающего напряжения. Подбор частоты обуславливался необходимостью полной и эффективной продувки газовой системы в течение 1/2 периода. Поэтому минимальный период составлял 4 секунды, максимальный - 16.

3) Разрядный промежуток. Величина разрядного промежутка изменялась от 0.05 до 1.0 мм. Слишком малая величина разрядного промежутка (менее 0.05 мм) препятствовала нормальной циркуляции газа, а слишком большая (более 1.0 мм) вызывала необходимость повышать рабочее напряжение за пределы рабочего напряжения выпрямителя (0-10 кВ). Устанавливался с помощью проставок из различных материалов (керамика, стекло, проволока и т.д.)

4) Материал диэлектрического электрода. Использовались три главных материала (стекло и два вида керамики) со значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon=5$ (стекло), $\epsilon=150$ и $\epsilon=1000$ (керамика). Систематическое исследование для всего интервала разрядных промежутков от 0.05 до 1.0 мм выполнялось на стекле и на керамике с $\epsilon=150$ как достаточно эффективной для синтеза озона. Также подобное исследование было проведено для стекла и для керамики с $\epsilon=1000$.

5) Площадь диэлектрического электрода. У электродов с $\epsilon=150$ она была равна $\sim 5-75 \text{ см}^2$, электрод с $\epsilon=1000$ имел площадь $\sim 6-75 \text{ см}^2$, а стеклянный электрод ($\epsilon=5$) для более быстрого накопления результатов был взят с площадью $\sim 50-75 \text{ см}^2$.

6) Толщина диэлектрического электрода. Менялась от 2.4 мм (стекло) до 15 мм (керамика с $\epsilon=1000$). Керамические электроды с $\epsilon=150$ имели толщину 4, 5 и 6 мм. Использование керамических электродов не требовало большого перенапряжения для зажигания и поддержания горения.

7) Скорость потока кислорода. Составляла от 8 до 15 литров в час. В большинстве экспериментов кислород подавался со скоростью 10 литров в час. Такая скорость достаточно экономична, обеспечивая при этом эффективную продувку газовой системы в течение 1/2 периода напряжения (5-8 секунд). Кратность продувки при этом была не менее 3.

8) Объем поглотительного раствора KI. Как правило, достигал 100 мл, но в экспериментах с небольшим ожидаемым выходом озона (промежуток 0.2 мм, стеклянный электрод и т.д.) заливало по 50-75 мл 1%-го раствора в каждую поглотительную колбу.

Установка позволяет получать достаточно точные количественные результаты. Это было достигнуто следующими методами:

1) Достаточная герметизация (в первой из использованных разрядных ячеек - на пружинах с уплотняющей прокладкой из фторкаучука, во второй - соединение верхней и нижней частей на 12 болтах и уплотняющих прокладках из фторкаучука). Все несоединительные отверстия по возможности тщательно герметизировались (например, вход высоковольтного провода в первой ячейке был загерметизирован пластической массой, а подвижный электрод во второй ячейке герметизировался гайкой-фиксатором с прокладкой из фторкаучука). В результате потери кислорода составляли не более 30% в первой ячейке и фактически отсутствовали во второй.

2) Точная синхронизация управляющих схем. Переключение газовых клапанов и высоковольтных ключей проводилось одними и теми же электронными схемами на "жесткой логике" (мультивибраторы), устойчивыми к помехам от высоковольтных устройств (в отличие, например, от микропроцессорных контроллеров). Процент ошибочных срабатываний, составлявший более 10% для микропроцессорной схемы, после замены ее на логическую упал до нуля.

3) Одинаковая степень поглощения озона в разных поглотительных колбах. Это было достигнуто посредством применения одинаковых фильтров-рассекателей и одинаковой высоты столба жидкости.

4) Точное измерение скорости потока, ставшее возможным благодаря применению электронного прибора вместо механического, а также использованию вместе с редуктором клапана-натекателя, позволявшего производить тонкую подстройку потока.

3. Исследование особенностей образования микрозарядов в различных ячейках барьерного разряда

Исследование электрических характеристик барьерного разряда.

На рис. 7 приведено распределение переносимого в импульсе тока заряда при использовании стеклянного электрода с разрядным промежутком 0.58 мм, а на рис. 8 - с промежутком 1.4 мм. На рис. 9 показаны аналогичные данные для керамического электрода и разрядного промежутка 0.18 мм.

Импульс тока состоит из серии микрозарядов, число которых различно для каждого импульса. Исходя из однотипности условий экспериментов, можно сказать, что заряд, переносимый через разрядный промежуток в каждом полупериоде, постоянен. Это подтверждено экспериментальными данными. При положительном напряжении на диэлектрическом электроде отдельный импульс тока состоит из конечного числа микрозарядов, в каждом из которых переносится заряд, составляющий десятые доли нанокуллона. В среднем за 1 импульс тока переносится порядка 0.5 нКл. при использовании стеклянного электрода с разрядным промежутком 0.58 мм.

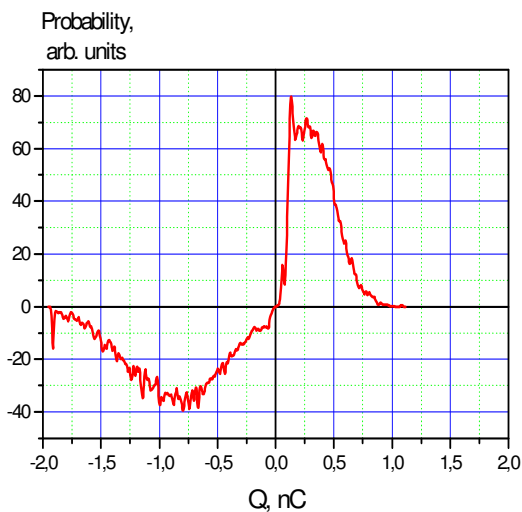


Рис. 7. Распределение величины переносимого в импульсе тока заряда. Диэлектрик - стекло ($\epsilon=5$, $b=2$ мм), $d=0.58$ мм

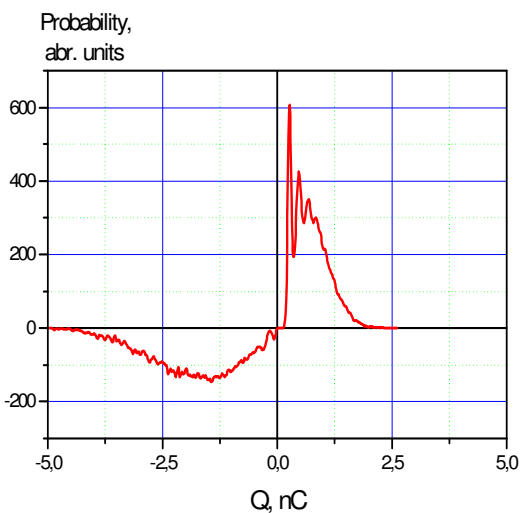


Рис. 8. Распределение величины переносимого в импульсе тока заряда. Диэлектрик - стекло ($\epsilon=5$, $b=2$ мм), $d=1.4$ мм

При отрицательном напряжении на диэлектрическом электроде импульсом тока переносится в 2-3 раза больший заряд. При этом тонкая структура, т.е. наличие разрешенных микрозарядов в распределении (рис. 7), не наблюдается.

Увеличение разрядного промежутка до 1.4 мм в целом приводит к росту переносимого заряда (рис. 8), сохраняя, однако, при этом описанные выше особенности. Заряд, переносимый отдельным микрозарядом в этих условиях, составляет 0.2-0.3 нКл. Причем, при положительной полярности на диэлектрическом электроде диаметром ~ 20 мм наблюдается 5-6 отдельных микрозарядов. При отрицательной полярности отдельные микрозаряды на этом распределении не различимы.

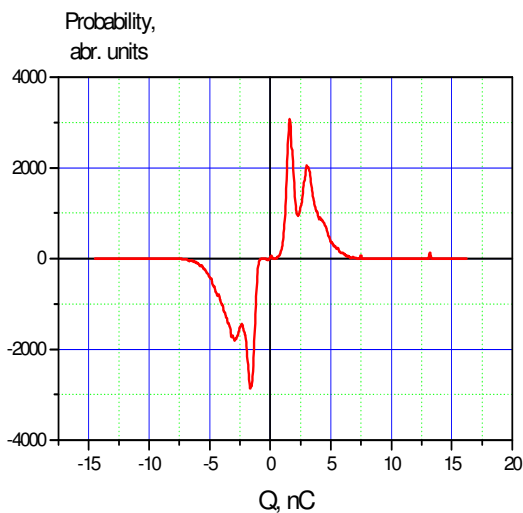


Рис. 9. Распределение величины переносимого в импульсе тока заряда. Диэлектрик - керамика ($\epsilon = 1000$, $b = 13$ мм), $d = 0.18$ мм.

На керамическом электроде указанные распределения зарядов совершенно отличается от тех же данных на стеклянном электроде. Прежде всего, начиная с некоторого значения разрядного промежутка (0.3-0.4 мм) правая и левая ветви графика становятся практически симметричными. Причем если на небольших промежутках еще можно наблюдать перенос отрицательного заряда в диффузном режиме, без отдельных микроразрядов, то на промежутках более 0.3 мм как положительный, так и отрицательный заряд переносится практически исключительно по каналному механизму (рис. 9). Так же, как и в случае со стеклянным электродом, площадь под кривыми (переносимый заряд) возрастает вместе с разрядным промежутком. В отдельной серии микроразрядов в этих условиях переносится по 1-2 нКл, число же микроразрядов на электроде диаметром 13 мм составляет 1-2 в серии (рис. 9).

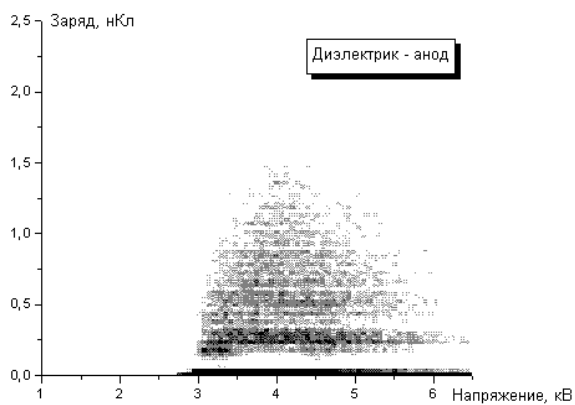
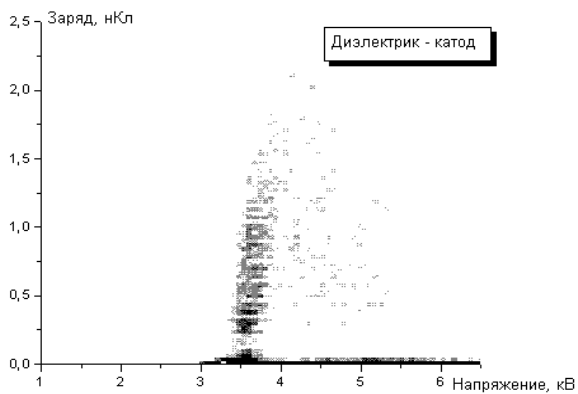


Рис.10. Амплитудно-фазовое распределение заряда на стеклянном электроде с разрядным промежутком 1.2 мм.

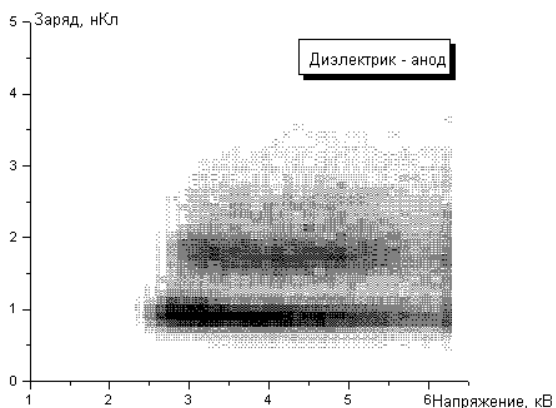
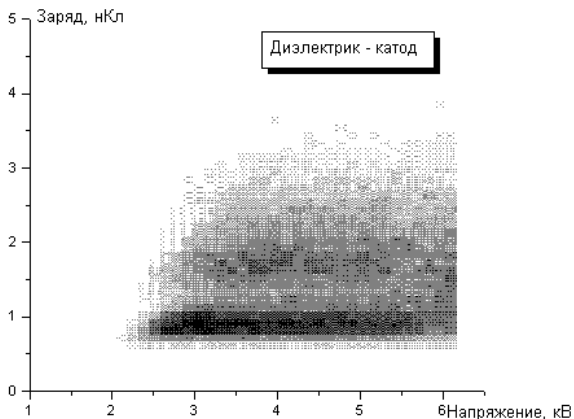


Рис. 11. Амплитудно-фазовое распределение заряда на керамическом электроде с разрядным промежутком 0.18 мм.

При этом отрицательный заряд, переносимый в диффузном режиме, переносится на стеклянном электроде небольшим числом "событий", за каждое из которых, однако, переносится значительный заряд. Положительный заряд, наоборот, переносится большим числом маломощных серий. Кроме того, видно, что отрицательный заряд на стекле переносится преимущественно на фронте, а положительный - все время положительной полуволны. На керамике, где и положительные, и отрицательные заряды переносятся в канальном режиме, это отличие не так заметно.

Синтез озона в барьерном разряде при различных условиях эксперимента.

На данной установке с керамическим диэлектрическим электродом ($b=4$ мм, $\epsilon=150$) были получены следующие результаты:

Таблица 1.

Разрядный промежуток d , мм	Выход озона при положительной полярности диэлектрика, мкг/ч	Выход озона при отрицательной полярности диэлектрика, мкг/ч	Соотношение выходов озона при положительной и отрицательной полярности диэлектрика
0.05	6	7.5	0.8
0.2	12	17	0.7
0.3	11	9.2	1.196
0.4	12.7	14.8	0.858
0.5	16	18	0.9
0.6	18	21	0.86
0.7	24	24	1
0.8	30	33	0.91
0.9	24	26.4	0.8

После повторной проверки системы и замены разрядной ячейки на герметичную ячейку с керамическим электродом площадью 75 см^2 и $\epsilon=150$ были получены следующие результаты:

Таблица 2.

Разрядный промежуток d , мм	Выход озона при положительной полярности диэлектрика, мкг/ч	Выход озона при отрицательной полярности диэлектрика, мкг/ч	Соотношение выходов озона при положительной и отрицательной полярности диэлектрика
0.0625	272	560	0.486
0.125	240	288	0.83
0.1875	432	336	1.286
0.250	168	112	1.5
0.375	360	312	1.154
0.500	360	336	1.07
0.625	504	456	1.105
0.750	240	240	1
0.875	312	360	0.87
1.0	600	672	0.89

На этой же разрядной ячейке, но со стеклянным электродом такой же площади, были получены следующие результаты:

Таблица 3.

Разрядный промежуток d, мм	Выход озона при положительной полярности диэлектрика, мкг/ч	Выход озона при отрицательной полярности диэлектрика, мкг/ч	Соотношение выходов озона при положительной и отрицательной полярности диэлектрика
~0	168	162	1.03
0.0625	96	168	0.57
0.125	216	504	0.43
0.250	132	204	0.647
0.375	240	228	1.05
0.500	720	624	1.15
0.625	336	456	0.74
0.750	792	840	0.94
0.875	720	792	0.91
1.0	312	336	0.92

На той же ячейке с керамическим электродом ($\epsilon=1000$) были получены следующие результаты:

Таблица 4.

Разрядный промежуток d, мм	Выход озона при положительной полярности диэлектрика, мкг/ч	Выход озона при отрицательной полярности диэлектрика, мкг/ч	Соотношение выходов озона при положительной и отрицательной полярности диэлектрика
-0.0625	2208	3048	0.724
~0	1176	1392	0.845
0.03125	768	336	2.29
0.0625	1824	1200	1.52
0.125	1488	1680	0.886
0.250	1536	2160	0.71
0.375	2496	3120	0.8
0.500	3216	3648	0.88
0.625	2016	2016	1.00
0.750	1296	1392	0.93
0.875	2640	2544	1.04
1.0	1680	1440	1.16

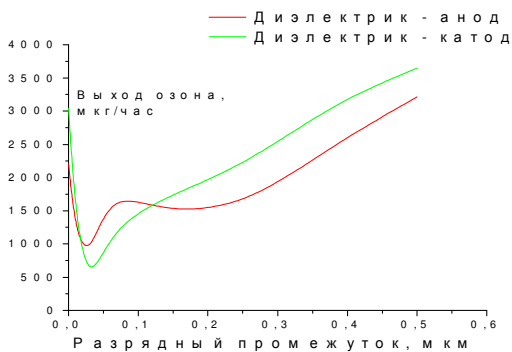


Рис.12. Зависимость эффективности синтеза озона от величины разрядного промежутка для электрода с $\epsilon=1000$, $\epsilon=5$.

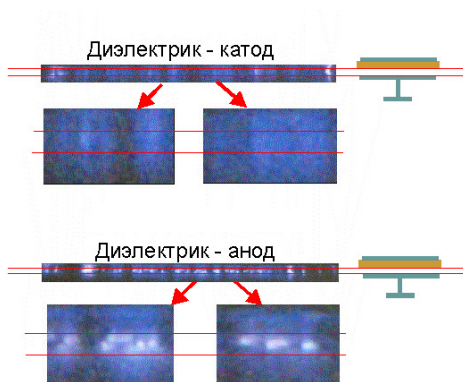


Рис.13. Фотографии разрядного промежутка при отрицательном и положительном напряжениях на диэлектрическом электроде. Разрядный промежуток 0.7 мм, среда - воздух, диэлектрик толщиной 13 мм, $\epsilon=1000$.

Теоретическое объяснение кривых зависимости $K(+/-)(d)$, полученных на керамике с $\epsilon=150$, следующее. На небольших разрядных промежутках (0.05-0.1 мм) главную роль играет прикатодный слой и фарадеево пространство. Эти области отличаются большой нелокальностью электронных процессов (электроны имеют большую энергию, так как за время пролета не успевают релаксировать в поле). Поэтому здесь выход озона (особенно на диэлектрическом катоде) гораздо выше, чем на больших промежутках.

В интервале 0.1-0.4 мм происходит образование стримеров и каналов переноса заряда на пути их прохождения. Так как стример движется от катода к аноду, то после его прохождения на аноде возникает падение напряженности и положительного напряжения. Если анод диэлектрический, то на этом месте образуется область пониженной напряженности и канал разрывается, но образовав развитой структуры. В случае же металлического анода локальное падение положительного напряжения, несравнимо меньшее, чем суммарное напряжение на аноде, вычитается из него, что фактически не влияет на анодное напряжение. Канал переноса заряда складывается в развитую структуру, что гораздо менее выгодно с точки зрения синтеза озона. Поэтому выход озона на диэлектрическом аноде в этом интервале гораздо выше.

При дальнейшем увеличении разрядного промежутка полярность диэлектрика перестает играть существенную роль, так как приэлектродные слои занимают незначительную часть межэлектродного пространства (т.е. рабочего объема). Поэтому значение K здесь стремится к единице.

Значительный разброс в значениях количественного выхода озона на разных промежутках можно объяснить разными значениями прикладываемого напряжения в каждом из экспериментов.

Первое, что надо отметить - относительная эффективность синтеза озона существенным образом зависит от величины разрядного промежутка. Этот параметр изменяется в три раза, от ~ 0.5 при величине разрядного промежутка 30-50 мкм до 1.3-1.5 при 300-500 мкм. Дальнейший рост промежутка до 1 мм выравнивает отношение выхода озона при различных полярностях, хотя выход озона при отрицательном напряжении на диэлектрике остается выше на 10 процентов. При уменьшении разрядного промежутка до нуля (с точностью установки промежутка до 5-10 микрон) выход озона на стеклянном электроде также выравнивается, но в случае электродов с высокими значениями \square выход при отрицательном напряжении на диэлектрике резко возрастает.

Абсолютная эффективность выхода пока точно не определялась. Тем не менее, некоторые заключения могут быть сделаны.

Абсолютная скорость синтеза озона на стеклянном и керамическом электродах одного порядка, хотя их погонная емкость (и, соответственно, величины переносимого заряда) относятся как 1:30. Это свидетельствует о сравнительной неэффективности синтеза озона в разрядном промежутке электронами при большой плотности последних (т.е. большой погонной емкости электродов).

При предельно малых размерах разрядного промежутка размножение электронных лавин не может быть большим. По этой причине объемный заряд также не может быть значительным. В этом случае движение электронов в разрядном промежутке может происходить в таунсендовском режиме, без образования объемного заряда. Напряженность поля в такой системе определяется из кривой Пашена, постоянна и не должна зависеть от полярности электродов. Эффективность синтеза в этом случае также не должна зависеть от

полярности, что и подтверждается результатами экспериментов на стеклянном электроде.

Рост разрядного промежутка приводит к появлению объемных эффектов. Результатом этого может быть:

- во-первых, образование катодного слоя и фарадеева пространства, размеры которых в данных условиях составляют порядка 50 мкм. Более того, они зависят от коэффициентов вторичной эмиссии поверхности - это может быть причиной значительной (в 2-3 раза) асимметрии эффективности синтеза озона от полярности электродов. Проводящий и диэлектрический катоды имеют разные размеры прикатодных областей.

- во-вторых, возможно появление принципиальной разницы в динамике переноса заряда. При диэлектрическом аноде электроды оседают на поверхности и распространяются по ней, расширяя зону влияния канала. Развита лавина, попадающая "под" осевший заряд, подавляется. По этой причине наблюдаются четко выраженные каналы с "пустыми" зонами вокруг них. Если же анодом является проводящий электрод, электроны не образуют осевший заряд. Так как положительные ионы имеют более чем на два порядка меньшую подвижность, они не успевают образовать заметный осевший заряд за время активного переноса заряда (10-30 нс). По этой причине перенос заряда осуществляется почти однородно по разрядному промежутку, а хорошо разрешенные каналы не образуются. В любом случае, на данных расстояниях синтез озона протекает значительно эффективнее, когда анодом является проводящий электрод.

При больших значениях разрядного промежутка доля прикатодной области по отношению ко всему промежутку невелика. Кроме того, время пролета электронов возрастает и все большая доля ионов успевает достичь анода. Все это смещает ситуацию в сторону большей симметрии процессов при различных полярностях электродов. Это и отражают результаты экспериментов.

4. Заключение

В ходе исследований, проводившихся на двух установках, было обнаружено, что тонкая структура барьерного разряда отличается при различной полярности диэлектрического электрода. Также на режим переноса заряда в барьерном разряде сильное влияние оказывают материал диэлектрика (значение диэлектрической проницаемости - ϵ) и ширина разрядного промежутка - d . В конечном итоге варьирование этих параметров сильно сказывается на выходе озона, о чем свидетельствуют полученные результаты количественного анализа. Предложена новая принципиальная электрическая схема представления разрядного промежутка асимметричного барьерного разряда, которая описывает его поведение гораздо точнее, нежели до сих пор встречавшиеся в литературе схемы.

Было показано, что:

1) Амплитуда переносимого заряда в асимметричной разрядной ячейке барьерного разряда зависит от полярности напряжения. Если анодом является проводящий электрод, то импульс тока переносит больший заряд;

2) Увеличение погонной емкости диэлектрика, так же, как и рост величины разрядного промежутка приводят к выравниванию величин переносимого заряда при положительной и отрицательной полярностях диэлектрика;

3) Если диэлектрический электрод - катод, заряд переносится значительно более мощным (в 2-3 раза) импульсом тока, который происходит при достижении условий пробоя на разрядном промежутке. При дальнейшем росте напряжения появление новых импульсов тока маловероятно;

4) При проводящем катоде заряд переносится многочисленными маломощными импульсами, практически равномерно распределенными на временном интервале от первого пробоя до амплитудной величины напряжения;

5) Перенос заряда при диэлектрическом аноде осуществляется в каналах микроразрядов, в то время как при противоположной полярности перенос заряда осуществляется практически однородно по поверхности электродов;

6) Относительная эффективность синтеза озона (при положительной и отрицательной полярностях диэлектрического электрода соответственно) близка к единице при разрядных промежутках порядка 10-20 мкм (для стеклянного электрода); минимальна (~ 0.5) при величине промежутка 50-70 мкм и достигает максимума ($\sim 1.3-1.5$) при разрядном промежутке 300-500 мкм в исследуемых экспериментальных условиях. При дальнейшем росте разрядного промежутка этот параметр выравнивается, хотя и наблюдается большая (на $\sim 10\%$) эффективность синтеза при отрицательной полярности диэлектрического электрода.

5. Литература.

1. Самойлович В.Г., В.И. Гибалов, К.В. Козлов. Физическая химия барьерного разряда. М., изд. МГУ, 1989, с. 21-23.
2. Элиассон Б., Г. Эсром Г., У. Когельшатц У. Новые УФ-излучатели для промышленных применений. Обзор АББ, № 3, 1991, с. 21-28. (Kogelschatz U. et. al. Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications. ICPIG XXIII, July 17 – 22, 1997, Toulouse, France).
3. Гибалов В.И., Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. Синтез озона в копланарном барьерном разряде // Журнал физической химии. – 2000. - № 6. - с.1141-1143.
4. J.R. Woodworth and P.F. McKay. J. Appl. Phys. 58(9), p. 3364.
5. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. Исследование генерации в газовых разрядах интенсивного ультрафиолетового излучения для эффективного возбуждения люминофоров. – Москва, 1997. Препринт НИИЯФ МГУ № 97- 49/500.
6. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. Бактерицидные установки для медицины на основе плазменных источников УФ и озона. - Конверсия, 1993, № 6, с.41-44.
7. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. Плазменный источник ультрафиолетового излучения для биотехнологии // Сборник трудов 7-го Международного семинара-презентации инновационных научно-технических проектов "Биотехнология-2003". 24-25 ноября 2003 г., Пущино. - стр. 131 (рус). - стр. 211 (англ.)
8. Савинов Е.Н. «Фотокаталитические методы очистки воды и воздуха». Соросовский образовательный журнал, том 6, № 11, 2000, стр.52-56.

**Алексей Вадимович Аванесов
Александр Турсунович Рахимов
Владимир Борисович Саенко**

**ДИНАМИКА И СТРУКТУРА ОБРАЗОВАНИЯ МИКРОШНУРОВ ПЛАЗМЫ В
БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2007 – 5/826

Работа поступила в ОНТИ 07.08.2007 г.